

Reakcja kruszywa z alkaliami w przypadku stosowania cementu o małej zawartości sodu i potasu

Alkali-aggregate reaction in the case of low-alkali cement

1. Wprowadzenie

Jak wiadomo krzemionka reaktywna w kruszywie może w pewnych warunkach spowodować zniszczenie betonu w wyniku powstania pęczniącego żelu krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego. Proces powstawania tego żelu wymaga jednak dużego stężenia alkaliów w roztworze w porach betonu i towarzyszącej mu znacznej koncentracji jonów hydroksylowych, zwiększających rozpuszczalność krzemionki. Ustalono maksymalną zawartość sodu i potasu w różnych rodzajach cementu, która wynosi 0,6% Na_2O_e w przypadku cementu bez dodatków mineralnych, natomiast dopuszcza się znacznie większy poziom tych składników w cementach z krzemionkowym popiołem lotnym, lub z granulowanym żużlem wielkopieczowym.

Natomiast osobny problem stanowi możliwość przechodzenia do roztworu w betonie jonów sodowych i potasowych pochodzących z minerałów zawartych w kruszywie. Zwykle w określaniu bezpiecznej zawartości alkaliów w porach betonu z kruszywa ulegającego reakcji z alkaliami uwzględnia się tylko alkalia pochodzące z materiału wiążącego. Niektóre kruszywa mogą dostarczać znaczne ilości alkaliów do roztworu w porach betonu, w związku z tym w konstrukcji betonowej wykonanej z cementu o małej zawartości sodu i potasu może także wystąpić reakcja kruszywa z alkaliami (1). Zagadnienie to jest dalekie od pełnego wyjaśnienia i brak jest systematycznych badań w tym zakresie.

Nie wyjaśniona w pełni jest także rola wtórnego ettringitu towarzyszącego reakcji kruszywa z alkaliami znajdowanego zwykle, obok żelu krzemianu sodowo-potasowo-wapniowego, w ulegającym korozji betonie. W niektórych pracach twierdza się nawet, że reakcję kruszywa z alkaliami prawie zawsze poprzedza powstawanie wtórnego ettringitu (2-5).

Powstawanie wtórnego ettringitu związane z poddawaniem mieszanki betonowej obróbce w podwyższonej temperaturze i nazywane „opóźnionym powstawaniem ettringitu” jest w zasadzie wyczerpująco omówione w literaturze (6, 7). Zniszczenie betonu wywołane powstawaniem wtórnego ettringitu obserwowane było

1. Introduction

As is generally known, reactive silica in the aggregate may under some conditions cause concrete deterioration resulting from the formation of swelling sodium-potassium-calcium silicate gel. This process of gel formation requires a high alkali concentration in the concrete pore solution and the accompanying considerable concentration of hydroxyl ions, which increase silica solubility. The maximum sodium and potassium content in various cement types has been established. It amounts to 0.6% Na_2O_e for cement without mineral additions, while a much higher content of alkali is acceptable in cements with siliceous fly ash or granulated blast-furnace slag.

A separate problem, in turn, is the possibility of sodium and potassium ions, passage to the pore solution of concrete from the minerals contained in the aggregate. Usually, while determining the safe alkali content in the concrete pore solution made of reactive aggregate, only the alkalis from the binding agent are taken into account. Some aggregates can deliver considerable amounts of alkali to the concrete pore solution. Consequently, in a concrete made of low-alkali cement, the alkali-aggregate reaction can occur (1). This issue has not been fully explained yet and no systematic research is being conducted in this respect.

The role of secondary ettringite which accompanies the alkali-aggregate reaction has likewise not been fully explained. Secondary ettringite is usually found, besides the sodium-potassium-calcium silicate gel, in corroded concrete. In some works, it is even claimed that the alkali-aggregate reaction is almost always preceded by the occurrence of secondary ettringite (2-5).

The formation of secondary ettringite is caused by heat treatment of concrete and called “delayed ettringite formation”. It has been, generally speaking, thoroughly discussed in the literature (6, 7). Concrete deterioration caused by secondary ettringite formation has also been found in concretes curing under normal conditions, and is linked to over sulphated cement (8) as well as anhydrite in clinker (9, 10).

również w betonach dojrzewających w warunkach normalnych i jest związane z za dużą zawartością siarczanów w cemencie (8), a także w klinkierze (9, 10).

W swoich badaniach autorka zetknęła się z przypadkami zniszczenia betonu wykonanego z cementu zawierającego mało alkaliów. Przypadki te wskazywały równocześnie na możliwość wystąpienia reakcji sodu i potasu z kruszywem. Z tego względu autorka postanowiła powrócić do tego zagadnienia biorąc pod uwagę możliwość wzbogacania roztworu w betonie w alkalia, pochodzące z kruszywa.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki badań ekspansji oraz mikrostruktury beleczek zaprawy wykonanej z cementu o małej zawartości alkaliów i z naturalnego kruszywa żwirowego, podatnego na reakcję z alkaliami. Z powyżej przedstawionych względów zbadano możliwość ługowania alkaliów ze składników kruszywa w roztworach wodorotlenków sodu lub potasu. Szczególną uwagę poświęcono także obserwacjom mikrostruktury zaprawy w celu potwierdzenia występowania wtórnego ettringitu.

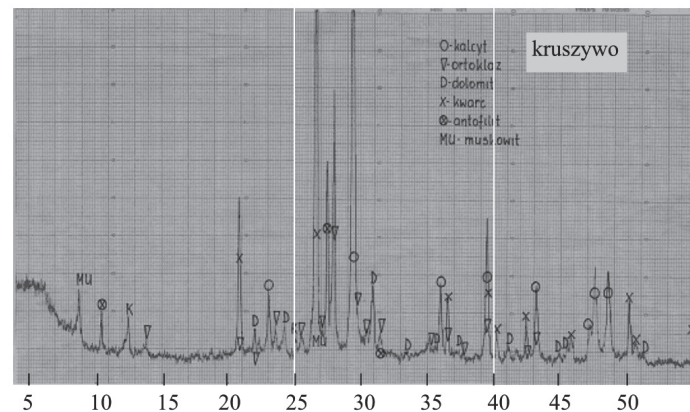
2. Materiały

2.1. Kruszywo

W badaniach zastosowano naturalne kruszywo żwirowe. Wyniki badań mikroskopowych i rentgenograficznych wykazały, że kruszywo zawiera dużo kwarcu i kalcytu, także ortoklaz, antofyllit i muskowit. Na rysunku 1 pokazano rentgenogram tego kruszywa. Badanie reaktywności kruszywa metodą ASTM C289 wykazało spadek alkaliczności $R_c = 105$ mmol NaOH/litr i zawartość rozpuszczalnej krzemionki $S_c = 267$ mmol SiO_2 /litr. Porównanie uzyskanych wyników badań z normowym kryterium oceny reaktywności kruszywa wykazało, że zastosowane kruszywo żwirowe jest reaktywne.

2.2. Cement

Zastosowano cement przemysłowy CEM I 42,5 HSR NA. Skład chemiczny i obliczony metodą Bogue'a skład mineralny cementu zamieszczono w tablicy 1. Powierzchnia właściwa cementu



Rys.1. Dyfraktogram kruszywa żwirowego

Fig. 1. X-ray pattern of natural gravel aggregate

In the research, author has come across cases of destruction of concrete made of a low-alkali cement. These cases have also pointed to the possibility of the reaction of sodium and potassium with the aggregate. In view of these, cases the author has decided to return to this issue, considering the possibility of enriching the concrete pore solution in alkalis coming from the aggregate.

In the present paper, the experimental results of expansion and microstructure of mortar made of low-alkali cement and reactive natural gravel aggregate, have been presented. Due to the above reasons, the possibility of alkali leaching from aggregate components in sodium or potassium hydroxide solutions has been tested. Particular attention has been paid to the observations of mortar microstructure in order to confirm the formation of secondary ettringite.

2. Materials

2.1. Aggregates

In the tests, natural gravel aggregate was used. The results of microscope and X-ray analyses have shown that this aggregate contains large amounts of quartz and calcite, as well as orthoclase, anthophyllit and muscovite. Fig. 1 shows a X-ray pattern of this aggregate. An aggregate reactivity test according to the ASTM C289 has revealed a decrease in alkalinity of $R_c = 105$ mmol NaOH/litre, and soluble silica content of $S_c = 267$ mmol SiO_2 /litre. A comparison of obtained results with the standard threshold value for aggregate reactivity has shown that the used gravel aggregate is reactive.

Tablica 1 / Table 1

SKŁAD CHEMICZNY I MINERALNY CEMENTU
CHEMICAL AND MINERAL COMPOSITION OF CEMENT

Składnik Component	Zawartość, % Content, %
Strata prażenia Loss of ignition	1,51
Części nierozpuszczalne Non soluble residue	1,02
SiO_2	21,47
Al_2O_3	3,87
Fe_2O_3	4,61
CaO	62,85
MgO	1,57
SO_3	2,42
Na_2O	0,12
K_2O	0,54
Na_2O_e	0,47
Cl	0,013
C_3S	61
βC_2S	13
C_3A	2,5
C_4AF	14
$C\bar{S}H_2$	4

wynosiła 3100 cm²/g, a wytrzymałość po 2 dniach 20,6 MPa i po 28 dniach 49,1 MPa. Cement spełniał więc wymagania normy PN-B-19707.

2.3. Zaprawa

Z cementu oraz kruszywa wykonano zaprawę do badań ekspansji wywołanej reakcją kruszywa z alkali, zgodnie z normą amerykańską ASTM C 227. Skład zaprawy i uziarnienie kruszywa podano w tablicy 2. Zaprawa dojrzewała w powietrzu, w temperaturze 38°C i wilgotności względnej większej niż 95%.

3. Wyniki badań

3.1. Zawartość rozpuszczalnych alkaliów w kruszywie

Dotychczas stosowane metody oznaczania rozpuszczalnych alkaliów, które przechodzą z kruszywa do roztworu w porach betonu, różnią się warunkami oznaczeń, rozdrobnieniem kruszywa, stosowanymi roztworami do wymywania alkaliów z kruszywa, temperaturą itp. (1, 11) Wszystkie te czynniki wpływają na oznaczoną zawartość alkaliów przechodzących z kruszywa do roztworu. W wielu metodach (12, 13, 14) roztworem stosowanym do wymywania alkaliów z kruszywa jest nasycony roztwór wodorotlenku wapnia, dający stężenie OH⁻ około 0,02 M i pH około 12,32. Natomiast w betonie o w/c = 0,5 i przy zawartości Na₂O_e około 1% w cemencie stężenie OH⁻ w roztworze w porach betonu po 28 dniach twardnienia wynosi około 0,74 M (15).

W badaniach zastosowano wodne roztwory: 0,7M NaOH w celu oznaczenia ilości potasu oraz roztwór 0,7M KOH w celu oznaczenia ilości sodu, przechodzących z kruszywa do roztworu. Próbki o masie 10 g kruszywa o uziarnieniu 0,15 do 0,3 mm umieszczano w szczelnych pojemnikach polietylenowych i dodawano 100 ml 0,7 M roztworu KOH lub NaOH. Temperatura przechowywania próbek wynosiła 38°C. Badania ilości rozpuszczalnych alkaliów wykonano po 14 dniach, gdyż po tym okresie rozpoczęła się ekspansja zaprawy. Zawartość sodu i potasu oznaczono metodą absorpcji atomowej na spektrofotometrze PE 3100 AAS.

Z kruszywa przeszło do roztworu po 14 dniach 0,095% K₂O i 0,029% Na₂O, co daje 0,094 % Na₂O_e. Można obliczyć, że alkalia wprowadzone z cementem dają 2,82 kg Na₂O_e/m³ zaprawy, a alkalia pochodzące z kruszywa 1,23 kg Na₂O_e/m³ (przyjmując skład zaprawy podany w tablicy 2). Całkowita zawartość alkaliów w roztworze w porach zaprawy, pochodzących z cementu i z kruszywa, może więc być większa niż 4 kg Na₂O_e/m³, pomimo zastosowania cementu o małej zawartości tych pierwiastków.

3.2. Badania ekspansji zaprawy

Wyniki badań ekspansji zaprawy według metody ASTM C 227 przedstawiono na rysunku 2.

Ekspansja zaprawy pojawia się już po czternastym dniu dojrzewania i do 180 dni wzrasta ze stałą mniej więcej szybkością, wynoszącą w przybliżeniu 0,01 % w ciągu 30 dni, a w dalszym

2.2. Cement

Industrial cement CEM I 42.5 HSR NA was used. Chemical and mineral composition of this cement, calculated according to Bogue's method, has been shown in Table 1. The specific surface of the cement was 3100 cm²/g, and strength – after 2 days – 20.6 MPa, and after 28 days – 49.1 MPa. Hence, the cement fulfilled the requirements of the PN-B-19707 standard.

2.3. Mortar

Mortar for testing the expansion caused by the alkali-aggregate reaction was prepared in accordance with the American ASTM C 227 standard. Mortar composition and aggregate granulometry have been given in Table 2. The mortar was air-cured at the temperature of 38°C and relative humidity exceeding 95%.

Tablica 2 /Table 2

UZIARNIENIE KRUSZYWA I SKŁAD ZAPRAWY WEDŁUG ASTM C 227
AGGREGATE GRANULOMETRY AND MORTAR COMPOSITION ACCORDING TO ASTM C 227

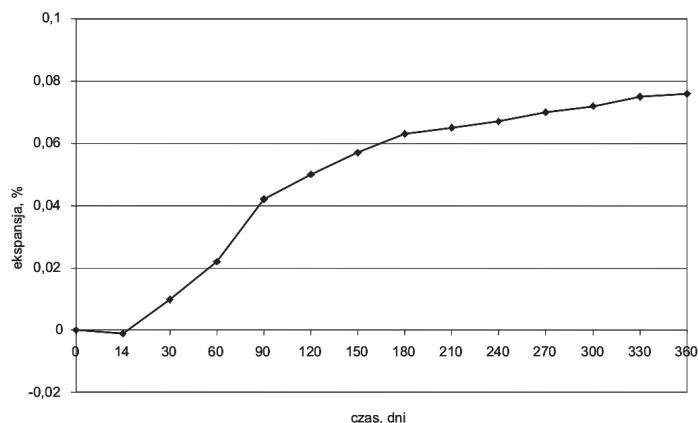
Uziarnienie kruszywa, mm Aggregate granulometry, mm		Skład zaprawy Mortar composition	
Frakcja, mm Fraction, mm	Zawartość, % masy Content, % mass	Składnik Component	Zawartość Content
0,15 ÷ 0,30	15	Cement Cement	600 kg/m ³
0,30 ÷ 0,60	25	Kruszywo Aggregate	1350 kg/m ³
0,60 ÷ 1,18	25	W/C	0,47
1,18 ÷ 2,36	25		
2,36 ÷ 4,75	10		

3. Test results

3.1. Soluble alkali content in the aggregate

Methods for the determination of soluble alkalis in the aggregate which can enter concrete pore solution differ in testing conditions, aggregate granulometry, the leaching solutions temperature, etc. (1, 11). All these factors affect the determined content of soluble alkali in aggregate. In many methods (12-14), the solution leaching alkali from aggregate is a saturated calcium hydroxide solution, giving the OH⁻ concentration of about 0.02 M and pH of about 12.32. In concrete with w/c = 0.5, and Na₂O_e content in cement of about 1%, the OH⁻ concentration in the concrete pore solution after 28 days of hardening amounts to about 0.74 M (15).

In our tests, of 0.7M NaOH and of 0.7M KOH water solutions were used in order to determine the potassium and sodium quantity passing from the aggregate to the solution. Samples containing 10 g of aggregate traction between 0.15 and 0.3 mm were placed in air-tight polyethylene containers, and 100 ml of the 0.7 M KOH or NaOH solution was added. The curing temperature of the samples was 38°C. Soluble alkali were determined after 14 days, of hardening that is after that period in which mortar expansion



Rys. 2. Ekspansja zapraw z kruszywa żwirowego i cementu CEM I HSR NA
Fig. 2. Expansion of mortar of gravel aggregate and CEM I HSR NA cement

okresie wzrost wydłużenia jest znacznie mniejszy i wynosi około 0,002% w ciągu 30 dni. Po 360 dniach ekspansja osiągnęła 0,076% i jest nieco mniejsza od granicznej wartości normowej dla kruszyw reaktywnych. Jednocześnie zaobserwowano w próbkach zaprawy wiele mikrospękań wywołanych przez tę ekspansję. Jak wykazały obserwacje pod mikroskopem skaningowym jest to proces związany z powstawaniem żelu krzemianu potasowo-wapniowego. Trzeba podkreślić, że pomimo wystąpienia ekspansji mniejszej niż graniczna, zaprawa uległa znacznej destrukcji i wytrzymałość zaprawy bardzo zmalała. Spadek wytrzymałości był tak znaczny, że beleczki zaprawy łamały się pod własnym ciężarem.

3.3. Badania mikrostruktury zaprawy

Do obserwacji mikrostruktury pod elektronowym mikroskopem skaningowym zastosowano szlify i przełamy próbek zaprawy. W zaprawie po 360 dniach dojrzewania wystąpiły liczne mikrospękania. Jak można było oczekiwać matryca zaczynu cementowego złożona jest głównie ze zbitego żelu C-S-H, w którym zgromadziły się te liczne mikrospękania. W miejscach zajętych uprzednio przez ziarna kruszywa znajdował się żel krzemianu potasowo-wapniowego, będący produktem reakcji kruszywa z alkaliom (rys. 3).

W makroporach zaprawy powstały znaczne ilości dobrze wykrystalizowanego ettringitu (rys. 4).

4. Omówienie wyników badań

Przeprowadzone badania wykazały, że w zaprawie z cementu o małej zawartości alkaliów - CEM I HSR NA i naturalnego kruszywa żwirowego wystąpiła reakcja alkalia-kruszywo. Reakcja ta spowodowała destrukcję zaprawy, pomimo że zmierzona ekspansja nie przekroczyła granicy wyznaczonej przez normę amerykańską ASTM C227 dla kruszyw reaktywnych. Równocześnie

began. Sodium and potassium content was determined by atom absorption method with the spectrophotometer PE 3100 AAS.

After 14 days, 0.095% K_2O and 0.029% Na_2O from the aggregate were soluted, which represent 0.094% Na_2O_e . It can be calculated that the alkali delivered with the cement give 2.82 kg Na_2O_e/m^3 of mortar, while the alkali from the aggregate – 1.23 kg Na_2O_e/m^3 (if mortar composition as shown in Table 2 is assumed). The total content of alkalis in the mortar pore solution, from the cement and from the aggregate, may then exceed 4 kg Na_2O_e/m^3 , despite the application of low-alkali cement.

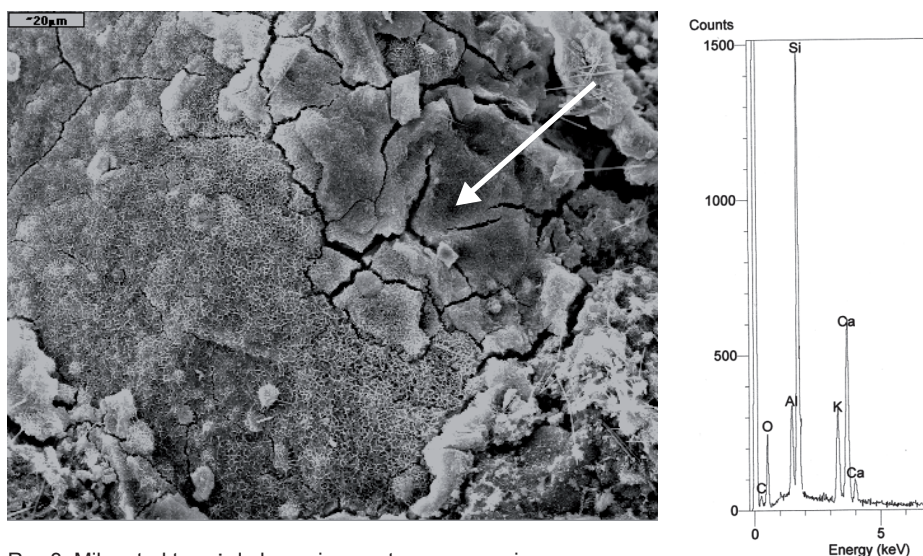
3.2. Mortar expansion test

Test results for mortar according to the ASTM C 227 have been shown in Fig. 2.

Mortar expansion occurs as early as after the fourteenth day of curing and it increases at a roughly stable rate until 180 days, equal about 0.01% over 30 days. In the following period, elongation is considerably lower and amounts to about 0.002% over 30 days. After 360 days, the expansion reached 0.076% and is slightly lower than the standard threshold value of expansion for reactive aggregate. Simultaneously, many microcracks were found in mortar samples as a result of this expansion. As SEM observation has shown, this process is related to the potassium-calcium silicate gel. It must be stressed that despite the occurrence of expansion lower than the threshold value, the mortar destruction was considerable and mortar strength was greatly reduced. The decrease in strength was so significant that mortar bars broke under their own weight.

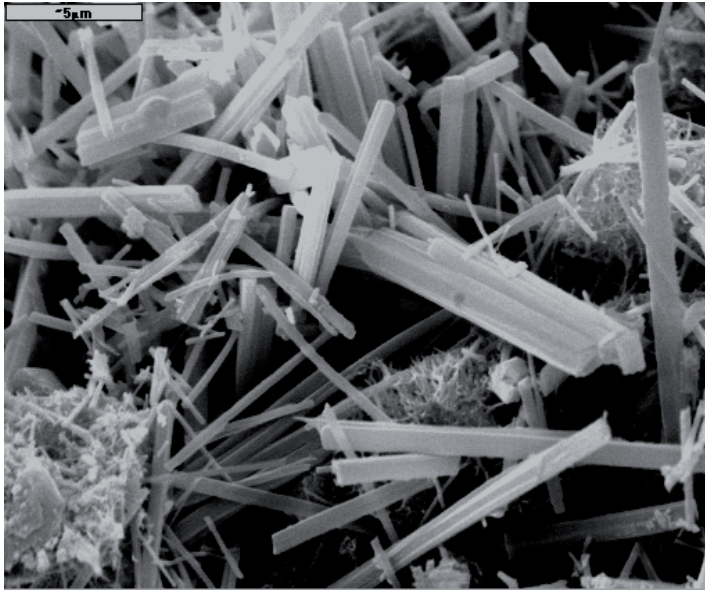
3.3. SEM examination of mortar

For SEM observation of mortar microstructure cuts and fractures specimens were used. After 360 days of curing, the mortar has shown numerous microcracks. As could be expected, the matrix



Rys.3. Mikrostruktura żelu krzemianu potasowo-wapniowego

Fig. 3. Microstructure of potassium-calcium silicate



Rys.4. Typowe kryształy ettringitu

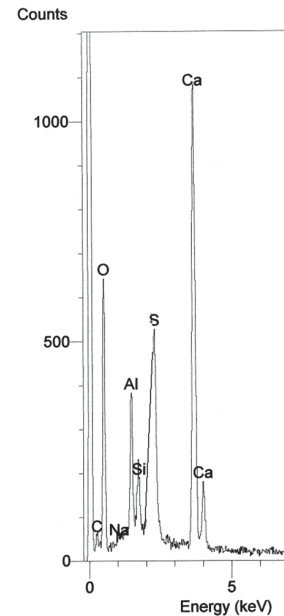
Fig. 4. Typical ettringite crystals

nie jednak potencjalna zawartość alkaliów w roztworze w porach zaprawy była znacznie większa od powszechnie przyjmowanej granicy $1,8 \text{ kg/m}^3$ zaprawy. Ponadto, jeżeli uwzględnimy alkalia, które mogły przejść w tym okresie do roztworu z kruszywa, to wówczas ich ilość bardzo znacznie przekracza tę dopuszczalną wartość i jak wykazano w punkcie 3.1. wynosi około 4 kg/m^3 zaprawy. W tym świetle ekspansja mniejsza od dopuszczalnej jest trudna do przyjęcia.

Można oszacować potencjalną ilość alkaliów w betonie z cementu o małej ich zawartości, przyjmując przeciętny skład betonu, to jest 300 kg cementu i 1800 kg kruszywa w m^3 betonu. Cement wprowadzić może $1,4 \text{ kg Na}_2\text{O}_e/\text{m}^3$, a więc poniżej wartości granicznej, lecz równocześnie kruszywo około $1,7 \text{ kg/m}^3$. Przy uwzględnieniu dodatkowej ilości alkaliów wprowadzonych z kruszywem, całkowita zawartość rozpuszczalnych alkaliów w betonie będzie większa niż $3,8 \text{ kg Na}_2\text{O}_e/\text{m}^3$, która oceniana jest jako zawartość szkodliwa (16).

Zdolność kruszyw do oddawania alkaliów do roztworu w porach betonu może mieć decydujące znaczenie w przypadku, gdy do wykonania betonu zostało zastosowane kruszywo reaktywne. Szczególnie w konstrukcjach narażonych na działanie wilgotnego środowiska zastosowanie cementu o małej zawartości alkaliów może być niewystarczającym środkiem zabezpieczającym beton przed destrukcją. W takich przypadkach należy stosować cementy hutnicze lub CEM II/B-V zawierające około 30% krzemionkowego popiołu lotnego.

W zaprawie zaobserwowano także znaczne ilości dobrze wykryształizowanego ettringitu, w pustkach powietrznych i rysach. W wielu pracach podkreśla się, że reakcja alkaliów z krzemionką sprzyja powstawaniu wtórnego ettringitu (4, 5). Najczęściej jest obserwowany ettringit masywny, występujący w rysach otaczających kruszywo, lecz w badanej zaprawie obserwowano go przede wszystkim w porach powietrznych (rysunek 4). Obserwacje mikro-



of the cement paste was composed mostly of compact C-S-H gel, in which numerous microcracks were found. In sites previously occupied by aggregate grains, the potassium-calcium silicate gel was found, which was a product of the alkali-aggregate reaction (Fig. 3). In mortar macropores, large quantities of well-crystallized ettringite (Fig. 4) have appeared.

4. Test results and discussion

The tests have shown that the alkali-aggregate reaction occurred in the mortar made of and natural gravel aggregate independently that a low-alkali cement – CEM I HSR NA was applied. This reaction caused mortar destruction despite the fact that the measured expansion did not exceed the limit specified by the American ASTM C227 standard for reactive aggregates. At the same time, the potential alkali content in the mortar pore solution considerably exceeded the generally accepted limit of 1.8 kg/m^3 of mortar. Moreover, taking into account the alkali which could be soluted from the aggregate and passed to the solution over that time, their concentration significantly exceeded the threshold value and, as shown in 3.1 point above, rised to about 4 kg/m^3 of mortar. In view of the above, expansion lower than the threshold value is hardly acceptable.

It is possible to estimate the potential quantity of the alkali in concrete made of a low-alkali cement, assuming standard concrete composition, i.e. 300 kg of cement and 1800 kg of the aggregate in 1 m^3 of concrete. Cement can deliver $1.4 \text{ kg Na}_2\text{O}_e/\text{m}^3$, which is below the threshold value, while the aggregate about 1.7 kg/m^3 . Taking into account the additional amount of the alkali coming from the aggregate, the total content of soluble alkali in concrete will be higher than $3.8 \text{ kg Na}_2\text{O}_e/\text{m}^3$, which is considered to be detrimental (16). The aggregate capacity for delivering the alkali to the concrete pore solution may be of crucial importance in cases where the concrete has been produced from reactive aggregate.

skopowe wydają się wskazywać, że jest to wynik rekryształizacji tej fazy występującej pierwotnie jako formy bezpostaciowe, lub bardzo drobnokrystaliczne. O rekryształizacji ettringitu wspominają także inni autorzy (17). Dalszych badań wymaga natomiast wyjaśnienie czy rekryształizacja ettringitu przyczynia się do destrukcji betonu.

5. Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- kruszywo może wprowadzać alkalia do roztworu w porach betony,
- zastosowanie cementu o małej zawartości alkaliów nie zawsze jest wystarczającym warunkiem zapobiegającym reakcji kruszywa z alkaliami,
- określona w normie ASTM graniczna wartość ekspansji dla reaktywnych kruszyw nie jest w pewnych przypadkach właściwa,
- reakcji alkaliów z krzemionką towarzyszy rekryształizacja ettringitu w utworzonych porach w zaprawie.

Literatura / References

1. D. Stark, M.S. Bhatti, Alkalis in Concrete, ASTM Spec. Tech. Publ. vol. 930, 16, (1986).
2. K. Pettifer, P.J. Nixon, Cement and Concrete Research, vol. 10, 173, (1980).
3. A. Shayan, G.W. Quick, Proc. Int. Conf. Cem. Microsc. 14th, 11, (1992).
4. V. Johanson, N. Thaulow, J. Skalny, Advances in Cement Research, 5, No. 17, 23, (1993).
5. S.L. Marusin, Magazine of Concrete Research, 46, No. 168, 163, (1994).
6. S. Klemm, F.M. Miller, Ettringite the sometimes host of destruction. Ed. B. Ertin, ACI SP-177, 81, (1999).
7. J.P. Skalny, Concrete Durability-an Issue of National Importance. Ed. J.M. Scantlon, ACI SP-100, 265, (1987).
8. S. Diamond, Cement and Concrete Composition, vol.18, 205, (1996).
9. W. Kurdowski, Cement and Concrete Research, vol. 32, 401, (2002).
10. W. Kurdowski, Cement Wapno Beton, 4, 142, (2001).
11. M. Kawamura, Proc. of the 8th Intern. Conf. on AAR, Society of Materials Science, Kyoto, 271, (1989).
12. Z. Owsiak, Cement Wapno Beton, 4, 151, (2001).
13. P.E. Grattan-Bellew, ACI Materials Journal, v. 91, 2, 173, (1994).
14. M.A. Berube i inni, Proc. of the 11th Int. Conf. AAR, 139, (2000).
15. J. Duchesne, M.A. Berube, Proc. of the 11th Intern. Conf. on AAR in Concrete, Quebec, 613, (2000).
16. W. Kurdowski, Chemia cementu, PWN, Warszawa, 1991.
17. K.L. Scrivener, H.F.W. Taylor, Advances in Cement Research, 5, No. 20, 139, (1993).

Particularly in structures exposed to humid environment, the application of low-alkali cement can be an insufficient means of preventing concrete corrosion.

In such cases slag cements or CEM II/B-V containing about 30% of siliceous fly ash should be used.

In mortar specimens, large amounts of well crystallized ettringite have also been found in air voids and microcracks. In many works it is stated that the alkali-silica reaction favours the formation of secondary ettringite (4, 5). Most frequently, massive ettringite is observed, occurring in microcracks surrounding the aggregate, yet in the tested mortar it was found primarily in the air pores (Fig. 4). SEM observation seems to suggest that this is the result of recrystallization of this phase, occurring originally as amorphous or in very fine crystals. Ettringite recrystallisation is also mentioned by other authors (17). Further research is needed to explain whether ettringite recrystallization contributes to concrete destruction.

5. Conclusions

From the conducted tests following conclusions can be drawn:

- the aggregate can contain soluble alkali which can enter to the concrete pore solution,
- the application of low-alkali cement is not always a sufficient factor preventing the alkali-aggregate reaction,
- the threshold value of expansion for non-alkali-reactive aggregates, as specified by the ASTM standard, does not pertain to certain cases,
- the alkali-silica reaction is accompanied by ettringite recrystallization in the macropores formed in mortar.